

(19) REPUBLIQUE FRANCAISE
INSTITUT NATIONAL
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE
PARIS

(11) N° de publication :
(A n'utiliser que pour
le classement et les
commandes de reproduction).

2.198.233

(21) N° d'enregistrement national
(A utiliser pour les paiements d'annuités,
les demandes de copies officielles et toutes
autres correspondances avec l'I.N.P.I.)

73.31249

DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

1^{re} PUBLICATION

- (22) Date de dépôt 29 août 1973, à 15 h 50 mn.
(41) Date de la mise à la disposition du
public de la demande B.O.P.I. — «Listes» n. 13 du 29-3-1974.
- (51) Classification internationale (Int. Cl.) H 01 f 17/06.
- (71) Déposant : HITACHI, LTD., résidant au Japon.
- (73) Titulaire : *Idem* (71)
- (74) Mandataire : Langner Parry, 7, rue de la Paix, Paris (2).
- (54) Inductance sur film mince.
- (72) Invention de : Kanji Kawakami, Masanobu Hanazono et Sadami Tomita.
- (33) (32) (31) Priorité conventionnelle : *Demande de brevet déposée au Japon le 30 août 1972,
n. 86.863/1972 au nom de la demanderesse.*

Cette invention concerne la structure d'inductances sur films minces incorporées dans des circuits intégrés à semi-conducteurs.

Avec les progrès de la technique des circuits intégrés à semiconducteurs, on a fortement réduit la surface unitaire d'éléments actifs comme les transistors et les diodes et d'éléments passifs comme les résistances, tandis que le coût unitaire de ces éléments subissait également une remarquable diminution. Toutefois, en ce qui concerne les inductances, celles-
10 ci continuent d'occuper, sur un substrat de silicium, une surface qui augmente avec le coefficient d'inductance propre, et leur coût augmente également, ce qui donne lieu à certaines difficultés d'application aux circuits intégrés.

Par exemple, on décrit dans "PROCEEDINGS OF THE IEEE",
15 Vol. 59, n° 10, Oct., 1971, pp. 1506-1510, une inductance formée par dépôt sur un substrat en saphir d'un film conducteur présentant un dessin en spirale. Selon cet exemple, on ne peut obtenir qu'un coefficient d'inductance de 40 nH pour une surface de 1 mm² environ. On utilise fréquemment une inductance
20 obtenue en enroulant une bobine autour d'un noyau annulaire de ferrite lorsqu'il est besoin d'un grand coefficient d'inductance. Toutefois, cette inductance n'est pas satisfaisante pour des applications aux circuits intégrés du fait qu'elle possède un grand diamètre externe de l'ordre d'au moins 2 à 3 mm et qu'elle
25 est coûteuse.

C'est donc un objectif de la présente invention de fournir une nouvelle inductance sur film mince qui est d'une dimension réduite et qui possède un grand coefficient d'inductance.

Un autre objectif de la présente invention est de fournir
30 une inductance sur film mince dont le coefficient peut être maintenu constant indépendamment des valeurs de l'intensité du courant et qui montre une caractéristique satisfaisante de fréquences en dépit du fait qu'on utilise une substance ferromagnétique.

35 Un autre objectif de la présente invention est de fournir une inductance sur film mince peu coûteuse que l'on peut facilement fabriquer.

Selon la présente invention, on fournit une inductance sur film mince comprenant un conducteur électrique et un film
40 ferromagnétique anisotrope uniaxe qui entoure ledit conducteur

et dont l'axe d'aimantation "difficile" est perpendiculaire au sens de passage du courant dans ledit conducteur.

D'autres objectifs, caractéristiques et avantages de la présente invention apparaîtront lors de la description détaillée 5 suivante faite en relation avec les dessins annexés, dans lesquels:

La figure 1 est une vue schématique en perspective montrant la structure fondamentale de principe d'une inductance sur film mince selon la présente invention;

10 La figure 2 représente la courbe de perméabilité relative et la courbe d'hystérésis obtenues pour l'inductance sur film mince de la présente invention;

La figure 3 est une vue schématique en perspective d'un mode de réalisation de la présente invention;

15 Les figures 4a à 4d montrent les opérations successives de la fabrication de l'inductance sur film mince représentée sur la Figure 3;

La figure 5 est une vue schématique en coupe d'un autre mode de réalisation de la présente invention;

20 La figure 6 est une vue schématique en perspective de l'inductance sur film mince représentée sur la Figure 5; et

La figure 7 est une vue schématique en coupe d'un autre mode de réalisation de la présente invention.

Si l'on se reporte maintenant à la Figure 1, qui représente 25 la structure fondamentale de principe d'une inductance sur film mince selon la présente invention, on peut voir que l'inductance sur film mince comprend un conducteur électrique 1 et un film ferromagnétique anisotrope uniaxe 2. Selon la présente invention, ce film ferromagnétique anisotrope uniaxe 2 entoure le 30 conducteur électrique 1 et son axe d'aimantation difficile est perpendiculaire au sens de passage du courant dans le conducteur 1. Ainsi, le champ magnétique produit par le passage du courant dans le conducteur 1 entoure le conducteur 1, et la direction d'aimantation du film ferromagnétique 2 coïncide 35 avec l'axe d'aimantation difficile.

On peut former le film ferromagnétique 2 entourant le conducteur 1 par placage d'un alliage binaire de fer et de nickel nommé Permalloy sur le conducteur 1, comme cela sera décrit de façon plus détaillée ci-dessous. On peut obtenir 40 l'anisotropie uniaxe du film ferromagnétique 2 en appliquant

un fort champ magnétique à l'alliage pendant l'opération de placage ou en effectuant un recuit de l'alliage dans un champ magnétique intense. Ceci est décrit dans "The Journal of the Institute of Electronic Communication Engineers of Japan", 5 Vol. 51, n° 6, June 1968, pp. 723-732. L'axe d'aimantation difficile apparaît dans une direction perpendiculaire à celle de l'application du champ magnétique intense pendant l'opération de placage ou le recuit.

On va maintenant discuter de la valeur du coefficient de l'inductance sur film mince de la présente invention ainsi obtenue. On suppose que, dans la structure d'inductance sur film mince représentée sur la Figure 1, a et b sont respectivement la largeur et l'épaisseur du conducteur 1, et t est l'épaisseur du film ferromagnétique 2. Lorsque la relation entre a et t est généralement donnée par $a \gg t$, la densité de flux magnétique dans le film ferromagnétique 2 est sensiblement uniforme dans la direction de l'épaisseur du film ferromagnétique 2 si le courant passe dans le conducteur 1 dans le sens indiqué par la flèche x sur la Figure 1.

Ainsi, la longueur moyenne du circuit magnétique, l_m , est, dans ce cas, donnée par l'équation suivante:

$$l_m = 2 (a + b + 2 t) \dots\dots\dots (1)$$

Si l'on suppose que l_x est la longueur du film ferromagnétique 2 dans le sens x du passage du courant, alors la réluctance R_c du film ferromagnétique 2 entourant le conducteur 1 est donnée par l'équation suivante:

$$R_c = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_c} \times \frac{l_m}{t \cdot l_x} = \frac{2 (a + b + 2 t)}{\mu_0 \cdot \mu_c \cdot t \cdot l_x} \dots\dots (2)$$

Où μ_0 est la perméabilité du vide et μ_c est la perméabilité relative du film ferromagnétique 2 dans la direction de l'axe d'aimantation difficile.

Généralement, le coefficient d'inductance L qui apparaît lorsqu'un noyau présentant une réluctance R_c entoure N conducteurs dans lesquels passe le même courant I dans le même sens, est donné par :

$$L = \frac{N \phi}{I} \dots\dots\dots (3)$$

où ϕ est le flux magnétique total traversant le noyau. Ce flux

magnétique total ϕ est donné par :

$$\phi = \frac{NI}{R_c} \quad \dots\dots\dots (4)$$

- 5 Ainsi, à partir des équations (3) et (4), on peut exprimer le coefficient d'inductance L sous la forme :

$$L = \frac{N^2}{R_c} \quad \dots\dots\dots (5)$$

- 10 En remplaçant R_c de l'équation (5) par sa valeur dans l'équation (2) et en exprimant le résultat dans les termes du système d'unités MKS, l'équation (2) se transforme en l'équation suivante:

$$15 \quad L = 2 \pi \mu_c N^2 \cdot \frac{t}{a + b + 2 t} \cdot l_x \cdot 10^{-7} \text{ H} \dots (6)$$

Sur la Figure 2, la courbe A représente la perméabilité relative μ_c du film ferromagnétique 2 dans le sens de l'axe d'aimantation difficile, et la courbe B représente le cycle d'hystérésis du film ferromagnétique 2 dans la même direction.

- 20 On voit sur la Figure 2 que la perméabilité relative μ_c dans la direction de l'axe d'aimantation difficile est pratiquement constante jusqu'en un point voisin de l'intensité du champ magnétique H_k correspondant à la densité de flux saturée de la courbe d'hystérésis B. Ainsi, comme on le comprend en considérant

- 25 l'équation (6), le coefficient d'inductance de l'inductance sur film mince selon la présente invention est maintenue constant indépendamment du courant de fonctionnement (le courant I passant dans le conducteur 1) jusqu'en un point situé immédiatement avant le point de saturation du film ferromagnétique 2.

- 30 Sur la Figure 2, les courbes en trait plein représentent des valeurs réellement mesurées et les courbes en trait pointillé représentent des valeurs idéales.

On doit comprendre en considérant la Figure 2 que la courbe d'hystérésis B dans la direction de l'axe d'aimantation difficile

- 35 est rectiligne par rapport à celle relative à la direction de l'axe d'aimantation facile et à celle de la technique antérieure. Ainsi, les pertes d'hystérésis ou les pertes électriques, qui donnent lieu à une diminution du facteur de qualité Q de l'inductance, sont moindres que ce qu'elles étaient jusqu'ici,

- 40 et il est créé une moindre quantité de chaleur en utilisation. Ceci est un avantage souhaitable pour les éléments de circuits intégrés.

En outre, il est dit que l'aimantation dans la direction de l'axe d'aimantation difficile est produite par la rotation du spin magnétique. Ainsi, l'inductance peut répondre de façon fiable à des variations du champ magnétique, c'est-à-dire à des variations de courant haute fréquence passant dans le conducteur 1, et montre une caractéristique haute fréquence satisfaisante.

Dans une expérience faite par les inventeurs, le conducteur a été plaqué au moyen d'un alliage binaire de fer et de nickel, soit de permalloy, dans les conditions indiquées sur le Tableau 1, et on a montré que le film ferromagnétique 2 présentait une anisotropie uniaxe jusqu'à une épaisseur de film de l'ordre de 5 microns. En outre, la perméabilité relative μ_c dans la direction de l'axe d'aimantation difficile est, dans ce cas, comprise entre 1.000 et 3.000.

TABEAU 1

Composition de la solution de placage	Sulfamate de nickel	307 g/l
	Sulfate ferreux	9,5 g/l
	Chlorhydrate d'hydroxylamine	6,0 g/l
	Acide borique	1,25 g/l
	Saccharate de sodium	3,75 g/l
	Acide citrique	25,0 g/l
Température de la solution		
de placage	$60^{\circ}\text{C} \pm 0,5^{\circ}\text{C}$	
Densité de courant	$2,5 \text{ A/dm}^2$	
Champ magnétique appliqué	40 Oe	

Lorsqu'on applique un traitement de recuit à un film de Permalloy obtenu par placage électrolytique, on effectue de préférence le recuit à 460°C pendant 200 heures sous vide.

On suppose maintenant que la perméabilité relative μ_c dans la direction de l'aimantation difficile est 2.000, que a , b et c de l'équation (6) sont respectivement égaux à 50, 2 et 5 microns, et que $l_x = 1 \text{ cm}$. De l'équation (6), on obtient donc une valeur d'inductance $L = 10^{-6} \text{ H}$, puisque $N = 1$ dans ce cas. ceci est la valeur du coefficient de l'inductance sur film mince selon l'invention, et on doit comprendre que l'inductance sur film mince de la présente invention possède un coefficient suffisamment grand malgré le fait que sa taille est très réduite par rapport à ce type d'inductances dans la technique antérieure.

Lorsqu'on utilise pour former le film ferromagnétique 2 du Permalloy contenant du nickel en plus grande proportion que le fer, sa densité de flux de saturation est de l'ordre de 0,8 à 1,2 Wb/m². Ainsi, le flux magnétique maximal dans le Permalloy dont l'épaisseur t et la longueur l_x sont respectivement 5 microns et 1 cm, est compris entre 4 et 6 x 10⁻⁸ Wb. D'autre part, la valeur maximale I_{\max} du courant passant dans le conducteur 1 est donnée par l'équation suivante, que l'on obtient en modifiant l'équation (3):

10

$$I_{\max} = \frac{N \phi_{\max}}{L} \quad A \quad \dots\dots\dots (7)$$

En portant dans l'équation (7) le coefficient d'inductance $L = 10^{-6}$ H, le flux magnétique maximal $\phi_{\max} = 4 - 6 \times 10^{-8}$ Wb, et $N = 1$, la valeur I_{\max} est donnée par

$$I_{\max} = 4 - 6 \times 10^{-2} \quad A$$

Cette valeur du courant est suffisamment acceptable pour des amplificateurs à transistors.

La figure 3 montre un mode de réalisation de l'inductance sur film mince selon la présente invention. Si l'on se reporte à la Figure 3, l'inductance sur film mince est désignée dans son ensemble par le numéro de référence 10, et est formée et maintenue sur un substrat 11. Des films de Permalloy déposés par placage 12 et 13, qui correspondent au film ferromagnétique 2 de la Figure 1, sont disposés en couches sur le substrat 11, et un film d'aluminium 14, qui correspond au conducteur électrique 1 de la Figure 1, est pris en sandwich entre les films de Permalloy 12 et 13. On prévoit aux extrémités opposées du film d'aluminium 14 deux parties formant bornes 14a et 14b destinées à être connectées électriquement à des fils.

De façon souhaitable, le substrat 11 est exempt de tout défaut, présente une surface plane et lisse et n'est sensiblement attaqué par les agents de placage qui sont appliqués sur les films 12, 13 et 14 que l'on a déposés sur le substrat. Les matériaux convenables qui satisfont à ces conditions comprennent le verre à vitres ordinaire, le verre ne contenant aucun métal alcalin (par exemple, le verre type 7059 de "Corning Company"), le verre de quartz, le quartz monocristallin, l'alumine monocristalline (c'est-à-dire le saphir), le spinelle

monocristallin, etc... On peut utiliser comme substrat 11 une plaque obtenue en appliquant une mince couche de verre dont la surface a été rendue lisse, sur la surface d'une céramique frittée, par exemple une céramique à l'alumine, une céramique 5 à la glucine ou une céramique à la magnésie. On peut encore utiliser une plaque de silicium ou une plaque de silicium portant une couche superficielle d'oxyde.

La surface du substrat 11 est, de façon souhaitable, finie à une planéité superficielle de 1 à 2 microns de manière à 10 améliorer la précision de l'opération de photogravure décrite ci-dessous. En outre, la rugosité superficielle est, de façon souhaitable, inférieure à 0,05-0,1 micron de manière que la pellicule de Permalloy déposée soit magnétiquement uniforme.

On va maintenant décrire en se reportant aux Figures 4a 15 à 4d les étapes successives de la fabrication de l'inductance sur film mince représentée sur la Figure 3.

Si l'on se reporte à la Figure 4a, on note qu'un film de Permalloy 12 d'une épaisseur de 5 microns environ est déposée électrolytiquement sur un substrat 11 dans les conditions indiquées sur le Tableau 1. Lorsque le substrat 11 est un isolant électrique, on peut déposer le film de Permalloy 12 en effectuant initialement un placage non électrolytique ou un dépôt de vapeur sous vide d'un métal conducteur à la surface du substrat 11 sur lequel on doit former l'inductance, de manière à déposer 25 un film conducteur d'environ 0,05 à 0,2 micron d'épaisseur sur sa surface, puis en effectuant un placage en se servant du film conducteur comme électrode. Pendant cette opération de placage, on applique un champ magnétique continu de 40 à 50 Oe dans une direction perpendiculaire au plan du dessin, de 30 manière à obtenir le film de Permalloy anisotrope uniaxe 12 dont l'axe d'aimantation difficile se trouve dans la direction horizontale du dessin.

On applique ensuite un film d'aluminium d'environ 0,2 à 0,5 micron d'épaisseur par dépôt de vapeur sous vide sur ce film 35 de Permalloy 12. On soumet ensuite ce film d'aluminium à une électrolyse en utilisant le film de Permalloy 12 comme anode dans une solution aqueuse contenant 50 g/l d'acide chromique, de manière à former un film 16 de Al_2O_3 (film d'oxydation anodique). On applique ensuite par dépôt de vapeur sous vide 40 un film d'aluminium 14 d'environ 3 microns d'épaisseur destiné

à servir de conducteur électrique, sur le film 16 de Al_2O_3 , et on dispose sur le film d'aluminium 14 un film 17 de vernis photosensible (photoresist) en vue du décapage des parties non nécessaires du film 14 de manière à permettre d'obtenir une
5 forme prédéterminée pour le conducteur, comme on le voit sur la Figure 3.

On immerge alors la structure représentée sur la Figure 4a dans une solution alcaline de manière à enlever par décapage des parties non nécessaires du film 16 de Al_2O_3 et du film
10 d'aluminium 14, sauf les parties protégées par le film de vernis photosensible 17 sans attaquer le film de Permalloy 12. La figure 4b montre l'état après cette opération de décapage.

On enlève le film de vernis photosensible 17 immédiatement après l'opération de décapage ci-dessus, et on forme un film 18
15 de Al_2O_3 sur la surface exposée du film d'aluminium 14 en pratiquant une électrolyse utilisant le film d'aluminium 14 comme anode. Ainsi, on couvre entièrement le film d'aluminium 14, qui est un conducteur, au moyen de films transparents 16 et 18 de Al_2O_3 (non représentés sur la Figure 4c), qui sont des isolants
20 électriques.

Après le traitement isolant décrit ci-dessus, on évapore un film conducteur (non représenté) environ 0,1 à 0,2 micron d'épaisseur sur toute la surface supérieure de la structure représentée sur la Figure 4c. Ce film conducteur est, de façon
25 souhaitable, formé d'un matériau comme le Permalloy, ou un alliage semblable, possédant une perméabilité élevée de façon à réduire la réluctance du film de Permalloy ferromagnétique à déposer sur le film conducteur au cours de l'opération suivante.

En utilisant ce film conducteur comme électrode, on effectue
30 un placage dans les mêmes conditions que celles employées au cours du dépôt du film de Permalloy 12, de manière à déposer un second film de Permalloy 13 sur le film conducteur tout en appliquant un champ magnétique. On dispose un film de vernis photosensible (photoresist) 19 sur ce film de Permalloy 13
35 dans le but de décaper des parties non nécessaires du film 13, de manière à obtenir une forme prédéterminée comme celle indiquée sur la Figure 3. Cet état est représenté sur la Figure 4d.

On immerge alors la structure représentée sur la Figure 4d dans une solution acide, par exemple une solution de persulfate
40 d'ammonium, de manière à retirer des parties non nécessaires

des films de permalloy 12 et 13 et du film conducteur (non représenté), sauf les parties recouvertes du film de vernis photosensible 19. On retire alors le film de vernis photosensible 19 de manière à obtenir une inductance sur couche mince 5 comme celle montrée sur la Figure 3.

On a laissé non décapées des parties du film de Permalloy 12 qui ont la même forme que celles des parties formant bornes 14a et 14b du film d'aluminium 14, et celles-ci se trouvent sous ces parties formant bornes 14a et 14b. Toutefois, du fait que 10 le film de Permalloy 13 ne se trouve pas au-dessous de ces parties du film de Permalloy 12, on ne fait que former un circuit magnétique ouvert entre eux en dépit du passage du courant dans les parties formant bornes 14a et 14b. Ainsi, le coefficient d'inductance de l'inductance sur film mince est donné par les 15 parties se recouvrant des films de Permalloy supérieur et inférieur 13 et 12. On recouvre, au niveau de leur surface extérieure, les parties formant bornes 14a et 14b du film d'aluminium 14 au moyen de films 16 et 18 de Al_2O_3 électriquement isolants, qui sont transparents et d'une épaisseur d'environ 0,1 à 1 micron. 20 On peut connecter ces parties formant bornes 14a et 14b à des fils de cuivre ou d'or par soudage par ultrasons.

Dans le mode de réalisation décrit ci-dessus, les films de permalloy ferromagnétiques 12 et 13 ont été formés par placage électrolytique. Toutefois, on peut déposer sur un substrat mono- 25 cristallin 11 des films de ferrite monocristalline anisotrope uniaxe par croissance épitaxiale, au lieu d'utiliser le Permalloy.

En outre, on peut utiliser un matériau ferromagnétique constitué principalement de fer. Un matériau préférentiel est 30 un alliage d'aluminium et de fer, par exemple un alliage de fer appelé Aluperm qui contient de 12 à 16%, en poids, d'aluminium. Il existe une grande différence entre les pressions de vapeur d'aluminium et du fer à la même température. Pour obtenir un film formé par dépôt de vapeur présentant un rapport 35 de composition voulu, il est donc souhaitable d'utiliser un alliage aluminium-fer dans lequel la teneur en aluminium est inférieure à celle donnée par le rapport de composition voulu. En outre, on peut obtenir un film d'alliage aluminium-fer présentant un rapport de composition voulu à l'aide du procédé 40 de l'évaporation éclair, dans lequel on laisse tomber par

intermittence en petites quantités de fines particules de l'alliage présentant le rapport de composition voulu, sur un creuset chauffé à une température élevée.

Aucune contrainte mécanique notable n'est communiquée à un film ferromagnétique d'un alliage de silicium et de fer, et, ainsi, cet alliage peut contenir de 5 à 15%, en poids, de silicium. Du fait de la grande teneur en silicium, on réduit la conductivité, ce qui réduit l'effet de peau, et on peut obtenir une perméabilité élevée même aux fréquences élevées. On peut également réduire les pertes par courants de Foucault. Pour les raisons données, ci-dessus, l'alliage silicium-fer est efficace pour la fabrication de la pellicule ferromagnétique.

Dans un circuit intégré, il est souhaitable que le choix de la forme de chaque élément particulier soit libre. On rencontre fréquemment des difficultés lors de la conception et de la fabrication d'un tel circuit, en particulier lorsque les bornes des éléments sont écartées les unes des autres d'une grande distance et que des fils de grande longueur peuvent être employés. Dans un cas semblable, on peut connecter en série plusieurs inductances sur film mince semblables à celle représentée sur la Figure 3, de manière à obtenir une inductance composée possédant tout coefficient d'inductance voulu.

Le mode de réalisation décrit ci-dessus se rapporte au cas où $N = 1$ dans l'équation (6). Toutefois, N peut être supérieur ou égal à 2 au lieu d'être égal à 1. Une telle inductance sur film mince présente un agencement de liaisons mutuelles d'un film ferromagnétique et de plusieurs couches ou spires de conducteurs électriques. On peut fabriquer une telle inductance sur film mince au moyen d'opérations identiques à celles décrites en rapport avec les Figures 4a à 4d et celle-ci présente une structure identique à celle montrée sur la Figure 3, mais on ne donnera pas une description détaillée des étapes de fabrication de façon à éviter les répétitions.

D'abord, on dépose un film de Permalloy sur un substrat. Puis, selon les opérations montrées sur les Figures 4a à 4c, on dispose en couches sur le film de Permalloy plusieurs (par exemple trois) combinaisons conducteur-isolant, consistant chacune en un film d'aluminium entièrement entouré par un film de Al_2O_3 , c'est-à-dire consistant chacune en un film d'aluminium conducteur du courant électriquement isolé par un film de Al_2O_3 .

et on dépose un autre film de Permalloy de manière à recouvrir ces combinaisons, aussi bien que le film de Permalloy précédemment déposé, comme le montre la Figure 3. On dispose un film de vernis photosensible (photoresist) d'un modèle voulu 5 de manière à couvrir des parties du film de Permalloy supérieur, et on effectue le décapage de manière à enlever des parties non nécessaires. Enfin, on utilise des fils de cuivre ou d'or pour connecter en série les films d'aluminium stratifiés de manière que ces films puissent former une bobine ou 10 qu'un courant puisse passer dans ces films d'aluminium dans le même sens.

Lorsqu'il faut un coefficient d'inductance de grande valeur et que l'épaisseur, aussi bien que la surface d'occupation de l'élément formé sur le substrat, sont limités, on prépare plusieurs 15 unités comportant chacune plusieurs films d'aluminium stratifiés semblables à ceux décrits ci-dessus, et on peut connecter en série successivement les films d'aluminium de ces unités de manière à former une inductance sur couche mince présentant tout coefficient d'inductance voulu.

20 On peut former sur le même unique substrat constitué d'un matériau magnétique anisotrope uniaxe une inductance sur couche mince comprenant plusieurs inductances unitaires. Dans ce cas, il est nécessaire d'agrandir la distance séparant les unités par rapport au cas où on utilise un matériau non magnétique 25 comme substrat, de manière à éviter l'interaction magnétique entre les unités.

On peut obtenir une telle inductance sur couche mince en utilisant un matériau ferromagnétique anisotrope uniaxe pour former le substrat commun des inductances unitaires sur couches 30 minces. On forme sur ce substrat commun des conducteurs électriques isolés les uns des autres comme cela a été décrit en rapport avec les Figures 4a à 4d, et on dispose naturellement ces conducteurs de manière qu'ils s'étendent perpendiculairement à l'axe d'aimantation difficile du substrat commun ferromagnétique, 35 Ce substrat commun ferromagnétique sert à former une partie du film ferromagnétique entourant les conducteurs électriques, et on dispose sur les

conducteurs électriques un autre film ferromagnétique d'une manière décrite en rapport avec les Figures 4a et 4d.

Lorsqu'on utilise le substrat commun ferromagnétique pour former une partie du film ferromagnétique entourant les conducteurs 5 électriques de la manière décrite ci-dessus, les valeurs a , b et t de l'équation (2) donnant la réductance et permettant d'obtenir le coefficient d'inductance sont simplement changées, et il ne se produit aucune influence sur la perméabilité, ce qui est un point essentiel pour l'obtention des résultats de la pré-
10 sente invention. Ainsi, on peut facilement obtenir une inductance sur couche mince présentant un coefficient d'inductance prédéterminé. En outre, du fait que les inductances unitaires sur couches minces sont écartées les unes des autres d'une distance relativement grande, il ne se produit pratiquement aucune inter-
15 férence magnétique. L'utilisation du substrat commun pour former une partie du film ferromagnétique entourant les conducteurs électriques est avantageuse en ce sens qu'on peut grandement réduire le nombre des étapes de fabrication, ainsi que le nombre des parties, ce qui contribue fortement à la réduction des coûts.

20 Il est nécessaire d'empêcher des pertes par hystérésis et des pertes par courants de Foucault de se produire dans le matériau ferromagnétique incorporé dans l'inductance lorsque l'inductance présentant une structure semblable à celle décrite ci-dessus fonctionne avec un courant de haute fréquence. La
25 structure de film mince de ce matériau ferromagnétique est efficace à empêcher ces pertes. Le fait d'interposer le film électriquement isolant entre les films minces de matériau ferromagnétique sert efficacement à isoler électriquement ces films minces les uns des autres et réduit les pertes par courants de
30 Foucault à une valeur minimale.

L'effet de peau apparaît dans le domaine des hautes fréquences. La profondeur δ de l'effet de peau est donnée par:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0 \bar{\mu}}}$$

35

Où ρ , $\bar{\mu}$, f et μ_0 sont respectivement la résistivité du matériau ferromagnétique, la perméabilité relative du matériau ferromagnétique, la fréquence de travail et la perméabilité du vide. En raison de cet effet de peau, le champ haute fréquence
40 est concentré dans la région allant de la surface du matériau

magnétique à la profondeur δ de l'effet de peau donnée par l'équation ci-dessus. Ainsi, seule la partie pelliculaire du matériau ferromagnétique sert efficacement aux lignes de force magnétiques, et les parties du matériau ferromagnétique situées 5 au-delà de la profondeur δ de l'effet de peau sont pratiquement inutiles et ont pour fonction d'augmenter les pertes par courants de Foucault. Dans un autre mode de réalisation de la présente invention, on choisit l'épaisseur du film ferromagnétique de façon qu'elle soit inférieure ou égale à la profondeur 10 de l'effet de peau, de manière à utiliser effectivement le matériau ferromagnétique.

La surface de la boucle d'hystérésis qui est reliée aux pertes par hystérésis est beaucoup plus petite dans la direction de l'axe d'aimantation difficile que dans la direction de l'axe 15 de facile aimantation. Lorsqu'on agence l'anisotropie magnétique uniaxe dans la couche mince de matériau ferromagnétique de manière que l'axe de facile aimantation coïncide avec la direction de passage de courant dans le conducteur, le champ magnétique induit par le courant est appliqué dans la direction 20 de l'axe d'aimantation difficile du film ferromagnétique. Ainsi, en plus de l'avantage conféré par la structure de film mince, on peut réduire les pertes par hystérésis et cet avantage est plus important dans le domaine des hautes fréquences.

Si l'on suppose que ϕ , R et I sont respectivement le flux 25 magnétique total passant dans le circuit magnétique formé par les films ferromagnétiques, la réluctance du matériau ferromagnétique et le courant passant dans le conducteur, alors le coefficient d'inductance L est donné par :

$$L = \phi / I$$

30 et, puisque $\phi = I/R$, L s'exprime sous la forme :

$$L = 1/R$$

Ainsi, le coefficient d'inductance L est inversement proportionnel à la réluctance R . On voit que l'on peut augmenter le coefficient d'inductance L en stratifiant le film ferromagnétique 35 en plusieurs couches de manière à réduire le coefficient de réluctance.

En outre, lorsque l'inductance présente une dimension fixe, la réluctance est déterminée par l'épaisseur des films ferromagnétiques stratifiés et le nombre de ces films. On ajuste 40 de façon convenable les conditions du dépôt de vapeur sous vide

ou des traitements de dépôt semblables de manière que les films ferromagnétiques aient une épaisseur uniforme qui soit inférieure ou égale à la profondeur de l'effet de peau. Ainsi, la réluctance est déterminée par le nombre de films ferromagnétiques stratifiés. On doit donc comprendre que le coefficient de l'inductance selon la présente invention peut être déterminé selon ce qui est souhaité, par un choix convenable du nombre des films ferromagnétiques stratifiés.

Lorsqu'on forme une série de ces films ferromagnétiques stratifiés, le champ coercitif de la structure stratifiée devient remarquablement plus petit que celui du film unique. Cette réduction du champ coercitif doit être associée aux avantages déjà décrits visant à minimiser les pertes d'énergie. En outre, la linéarité de la boucle d'hystérésis et la réduction du champ coercitif ont un effet efficace sur la réduction du temps de commutation due à l'aimantation par impulsions.

Les figures 5 et 6 représentent un autre mode de réalisation de la présente invention. Un substrat 19 destiné à porter une inductance est fait, de façon souhaitable, d'un matériau qui est exempt de tout pore, à une surface plane et lisse et est d'une résistance mécanique suffisante pour supporter la manipulation. Des matériaux qui conviennent pour former le substrat 19 comprennent le verre à vitre ordinaire, le verre non alcalin, le verre de quartz, le quartz monocristallin et l'alumine monocristalline.

On forme par dépôt de vapeur sous vide sur le substrat 19 un film 20 d'un matériau ferromagnétique, comme le Permalloy, d'une épaisseur de 0,1 micron, comme le montre la Figure 5. On utilise un masque au cours du dépôt de vapeur sous vide du film de Permalloy 20 de façon à obtenir une forme voulue. Pendant le dépôt de vapeur sous vide de ce film de Permalloy 20, on applique un champ magnétique continu de 40 à 50 Oe de manière à produire une anisotropie magnétique uniaxe dans le film de Permalloy 20, si bien que l'axe d'aimantation difficile se trouve dans une direction voulue.

Ensuite, on dépose sur le film de Permalloy 20 un film 21 d'un isolant électrique comme le mono-oxyde de silicium. La forme de ce film isolant 21 est la même que celle du film de Permalloy 20. Ultérieurement, on dépose successivement par dépôt de vapeur sous vide sur le premier film isolant 21 un

On dépose par dépôt de vapeur sous vide tous les films de Permalloy 20, 22, 26 et 28 pendant l'application d'un champ magnétique dans la direction du passage du courant dans le film conducteur 25, et, ainsi, ces films possèdent une anisotropie magnétique uniaxe telle que l'axe d'aimantation difficile de chacun d'eux est situé dans la direction perpendiculaire à celle du passage du courant dans le film conducteur 25. En outre, les pertes par hystérésis dans les films de Permalloy sont remarquablement faibles du fait que le champ magnétique alternatif induit dans les films de Permalloy par le courant de haute fréquence passant dans le film conducteur 25 est dirigé

vers l'axe d'aimantation difficile qui est perpendiculaire à l'axe de facile aimantation.

Dans ce mode de réalisation, on a utilisé, à titre d'exemple, un substrat fait d'un isolant électrique qui est exempt de pores, a une surface plane et lisse et est d'une résistance mécanique suffisante pour supporter la manipulation. Toutefois, ce substrat peut être un corps de céramique frittée poreux comme une céramique à l'alumine, une céramique à la glucine ou une céramique à la magnésie, dont la surface a été recouverte d'une mince couche de verre. En outre, le substrat peut être un conducteur électrique dont la surface a été recouverte par dépôt de vapeur sous vide d'un film d'un isolant électrique comme le mono-oxyde de silicium.

Le film ferromagnétique anisotrope uniaxe peut être formé de ferrite nickel-zinc au lieu de Permalloy.

Dans le mode de réalisation représenté sur les Figures 5 et 6, les films de Permalloy 20, 22, 26 et 28 sont isolés les uns des autres par les films isolants 21, 23, 24 et 27 de mono-oxyde de silicium. Toutefois, les parties formant pattes de ces films de Permalloy peuvent être rendues plus longues que celles des films isolants, de sorte que les parties formant pattes des films de Permalloy puissent être connectées ensemble en des points disposés au-delà des parties formant pattes des films isolants. Une telle structure est représentée sur la Figure 7. Si l'on se reporte à la Figure 7, on note qu'une série de films de Permalloy 31, 33, 34 et 36, formés sur un substrat fait d'un isolant électrique, sont magnétiquement couplés les uns aux autres de manière à former un unique circuit magnétique fermé, si bien qu'on peut diminuer la réluctance et augmenter le coefficient d'inductance. Plusieurs films isolants 32, 35 et 37 sont disposés entre ces films ferromagnétiques et un film conducteur est disposé dans le film isolant 35.

L'inducteur sur couche mince selon la présente invention peut être largement utilisé, par exemple comme transformateur, filtre, élément à constante distribuée et ligne retardatrice d'impulsions, dans des circuits intégrés hautes fréquences destinés à être employés dans des récepteurs de télévision, des postes de radio, et des dispositifs semblables.

REVEN DICATIONS

1. Inductance sur film mince comprenant un conducteur électrique et un film ferromagnétique anisotrope uniaxe entourant ledit conducteur, l'axe d'aimantation difficile dudit film
5 ferromagnétique anisotrope uniaxe étant perpendiculaire à la direction du passage du courant dans ledit conducteur.
2. Inductance sur film mince comprenant un groupe d'au moins deux conducteurs électriques stratifiés isolés électriquement l'un de l'autre, et un film ferromagnétique anisotrope uniaxe
10 entourant ledit groupe de conducteurs, l'axe d'aimantation difficile dudit film ferromagnétique anisotrope uniaxe étant perpendiculaire à la direction du passage du courant dans ledit groupe de conducteurs.
3. Inductance sur film mince selon la revendication 2,
15 caractérisée en ce que plusieurs films ferromagnétiques d'une épaisseur inférieure ou égale à la profondeur de l'effet de peau à la fréquence de travail sont stratifiés par l'intermédiaire de films électriquement isolants de manière à créer un circuit magnétique entourant lesdits conducteurs.
- 20 4. Inductance sur film mince, comprenant un conducteur électrique et plusieurs films ferromagnétiques anisotropes uniaxes d'une épaisseur inférieure ou égale à la profondeur de l'effet de peau à la fréquence de travail, l'axe de facile aimantation de chaque dit film ferromagnétique anisotrope uniaxe coïncidant
25 avec la direction du passage du courant dans ledit conducteur, et lesdits films ferromagnétiques anisotropes uniaxes étant stratifiés par l'intermédiaire de films électriquement isolants de manière à créer un circuit magnétique entourant ledit conducteur.
5. Inductance sur film mince selon la revendication 4,
30 caractérisée en ce que lesdits films ferromagnétiques sont en contact mécanique les uns avec les autres, de manière à réduire la réluctance.
6. Inductance sur film mince selon la revendication 4, caractérisée en ce que lesdits films ferromagnétiques anisotropes uniaxes sont disposés concentriquement autour dudit conducteur.

FIG. 1

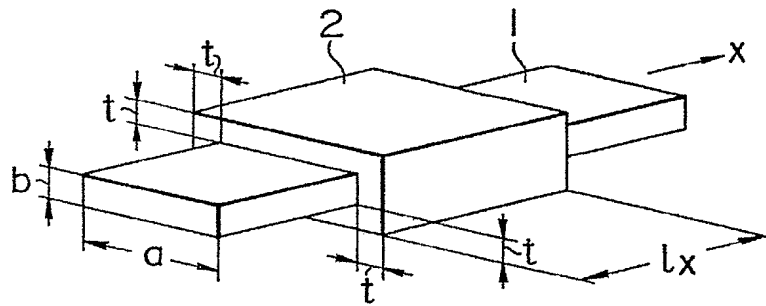


FIG. 2

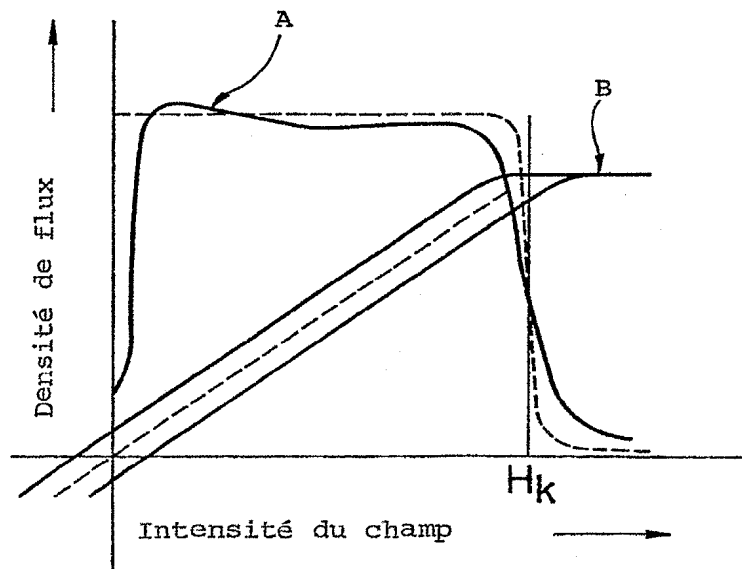


FIG. 3

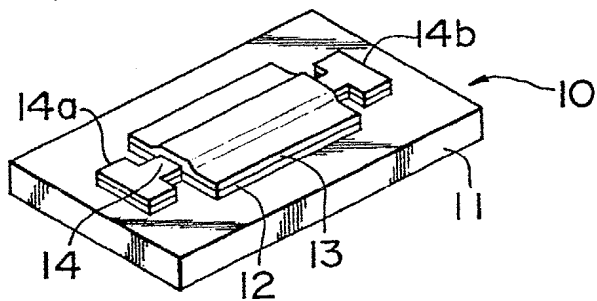


FIG. 4a

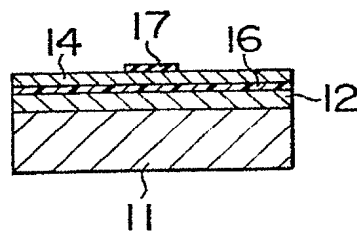


FIG. 4b

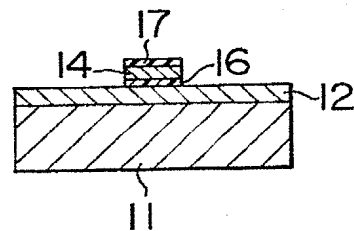


FIG. 4c

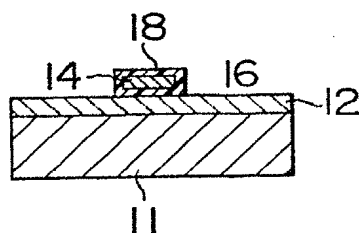


FIG. 4d

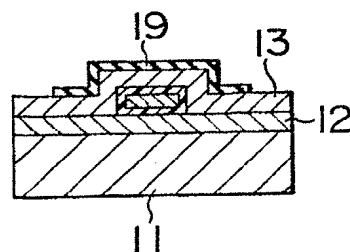


FIG. 5

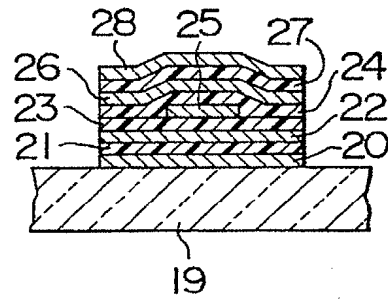


FIG. 6

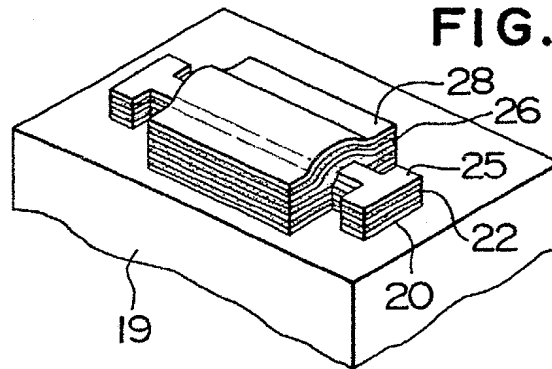


FIG. 7

